

磁場閉じ込め核融合燃焼プラズマの異常輸送シミュレーション Anomalous transport simulations of burning plasma in magnetic fusion

渡邊 智彦

Tomo-Hiko WATANABE

名大院・理

Dep. Phys., Nagoya Univ.

はじめに

磁場閉じ込め核融合研究におけるマイルストーンとして、核燃焼プラズマの科学的実証を目指してITER実験の準備が進められている。周知のように、磁場閉じ込め核融合では、密度およそ 10^{20}m^{-3} 、温度およそ 10keV を超える重水素(D)-三重水素(T)プラズマを生成し、加熱・燃料供給・不純物・プラズマ分布形状・回転・電流分布などを制御した上で、定常的な核融合反応の維持を目指している。

本講演では、核燃焼を想定した磁場閉じ込めプラズマにおいて鍵となる異常輸送、すなわち乱流や電磁場揺動によって駆動される輸送過程に焦点をあて、数値シミュレーションを用いた理論的側面からの研究状況について紹介するとともに、今後の課題について議論する。

磁場閉じ込めプラズマの特徴

爆縮などをともなうレーザー核融合における点火過程とは対照的に、磁場閉じ込めプラズマでの核融合反応は、定常的かつ一定の空間的広がりを持って進むと想定される。トカマクやヘリカル型などのトーラス型磁場閉じ込めプラズマにおいては、超伝導コイルならびにプラズマ中を流れる電流で生成された数T(テスラ)の磁場でプラズマの圧力勾配を支えている。この圧力分布を与える上記の密度・温度条件の下では、プラズマを構成する電子やD、T原子核(イオン)の二体衝突は、電磁場を介した集団的運動に比して十分小さい。さらに電子やイオンの平均自由行程は、装置サイズをはるかに上回る 10^4m のオーダーに及ぶ。したがって、プラズマの密度・温度は磁力線がつくる閉じたトーラス形状の曲面(磁気面)上で一定となり、またトーラス小半径方向には比較的緩やかな分布を持つ。核燃焼状態においても、この分布は概ね維持されると考えられるが、定常的な核燃焼プラズマの維持には、核反応生成 α 粒子を含め、

プラズマを構成する各粒子種の密度・運動量・温度分布形状をいかに保つか、が課題となる。

しかし、上述のプラズマ電流や圧力勾配を駆動源として種々のプラズマ不安定性が発生する可能性がある。プラズマを保持するために危険な磁気流体力学的不安定性を回避して運転が行われるが、ドリフト波などの粒子運動論的効果に関わる微視的な不安定性は避け難い。微視的不安定性により生じる電磁場揺動や乱流により、プラズマの粒子・運動量・熱の輸送が発生し、プラズマの分布形状変化や閉じ込め特性の悪化をもたらすことが危惧される。こうしたプラズマ中の非線形揺動や乱流輸送の機構解明と閉じ込め特性改善のため、磁場閉じ込めプラズマの第一原理にもとづいたシミュレーション研究が進められている。以下では、それらの内、核燃焼生成 α 粒子などの高エネルギー荷電粒子に関わる不安定性や輸送・加熱過程、ならびに、核燃焼を想定した多種粒子のもとのプラズマ乱流輸送について簡潔にまとめる。

高エネルギー粒子駆動不安定性と輸送・加熱

DT反応で生成される α 粒子は、燃料となるDT分布に応じて空間勾配をもつ。 α 粒子による電子加熱を通じて核反応を連鎖的に引き起こすためには、 α 粒子を効率よく閉じ込めることが課題となる。磁場中で運動する α 粒子は、その空間不均一性をもとにアルヴェン波を励起し、自らの閉じ込めを悪化させることが危惧される。磁気シアがある場合には、アルヴェン波は連続スペクトルをもつため減衰を受けるが、トロイダル形状に起因した周波数ギャップが存在する場合、そこでアルヴェン波が励起される。これをトロイダルアルヴェン固有モード(TAE)と呼ぶ。 α 粒子によるTAE励起の可能性が理論的に指摘されて以降、実験のみならず数値シミュレーションを用いた綿密な解析が進められてきた。この解析には、背景プラズマ

を磁気流体、高エネルギー粒子を運動論的に取り扱うハイブリッド・シミュレーションが用いられ、飽和過程における粒子捕捉や波動の周波数変調などが同定され、既存の磁場閉じ込めプラズマ実験とも良い対応を示している。

高エネルギー粒子により駆動される電磁場揺動は、閉じ込めの悪化をもたらすばかりではなく、燃料粒子となる背景イオンの加熱に援用することも検討されている。これは α チャネリングとも称され、大域的な電場振動の減衰過程においてイオン温度上昇が期待される。

多種粒子プラズマ中の乱流輸送

背景プラズマの密度・温度勾配がある閾値を超えると様々な種類のドリフト波が不安定性を介して成長し、乱流輸送が駆動される。磁場閉じ込めプラズマの乱流輸送研究における課題は、非線形粒子運動論を扱う困難性と同時に、乱流自身の多様性にある。プラズマ密度勾配とイオン・電子温度勾配によって、異なる種類のドリフト波が励起され、そこから導かれる乱流輸送も質的に異なった性質を示す。

ITERなどの核燃焼プラズマは外部からの運動量注入が困難であり、プラズマ回転により巨視的な安定性を保つには、トーラスプラズマの自発回転に頼ることになる。そこでは、乱流による角運動量輸送が重要となるが、乱流の種別によって、角運動量輸送、すなわち、プラズマへのトルクが大きく影響されることが指摘されている。

また、言うまでもなく、核燃焼プラズマは、複数種のイオンを含む多種粒子系である。そのため、乱流による粒子輸送特性がD/T混合比によってどのように影響を受けるか、逆に、粒子輸送はD/T混合率にどのような影響を及ぼすか、という点は、核燃焼効率を検討する上で重要な要素となる。同時に、乱流輸送に同位体効果がどのような影響を与えるか、すなわち、重水素や三重水素による閉じ込め改善の機構とその外挿性については、実験のみならず理論・シミュレーション研究においても長年の研究課題である。近年のシミュレーション研究においては、トーラス磁場に捕捉された電子が駆動する不安定性(TEM不安定性)において、イオン質量の増大にともなう閉じ込め改善が示されているが、イオン温度勾配で駆動される乱流(ITG乱流)における同位体効果や、閉じ込め改善モード(H-モード)放電との関連など、理論的には未解明な課題が残されている。

上記では、主に重水素や三重水素などのイオンのジャイロ半径程度の特性長をもつ乱流揺動を議論した。しかし、同時に電子がもつ温度勾配によって、電子ジャイロ半径を特性長とする乱流(ETG乱流)が発生することが知られている。このスケール長の大きく異なる乱流揺動が共存する場合にどのような輸送現象が発現するか、という問題は、マルチスケール乱流輸送として知られ、近年のスーパーコンピュータを用いたシミュレーションによってその一端が明らかになってきた。興味深いことに、ETG乱流が駆動される条件下では、TEM不安定性の成長が抑制され、全体として電子熱輸送が低下するという現象が見出された。これは、 α 粒子による電子加熱の効率を高める方向に作用するが、電子温度が高くなるとETG不安定性は抑制される傾向があるため、最適な電子温度のパラメータ領域が存在する可能性を示唆している。

輸送現象のマルチフィジックス相互作用

上述の二つの課題、すなわち、高エネルギー粒子によるアルヴェン波励起と微視的乱流による輸送現象は、これまで個別に議論されてきたが、最近の研究では、両者の相互作用の存在が指摘されている。高エネルギー粒子によって励起されたTAEが、非線形相互作用を介してドリフト波不安定性を抑制する一方、全体の輸送を増大させる働きをすることが指摘されている。

おわりに

磁場閉じ込め核燃焼プラズマは、同位体や多種粒子効果、 α 粒子との相互作用など、水素プラズマには含まれない新奇な物理過程を含んでおり、核反応によるエネルギー生成のみならず、プラズマ物理においても未解決の問題を提示している。核燃焼プラズマという未踏のパラメータ領域に挑む上で、その土台となる物理過程をつまびらかにすることが必要である。

謝辞

本講演で紹介する内容の一部は、「富岳」成果創出加速プログラム「核燃焼プラズマ閉じ込め物理の開拓」(JPMXP1020200103)ならびにHPCI課題(hp200127, hp210178)の支援を受けています。